

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Фундаментальная математика и механика

Механика деформируемого твердого тела

Гурин Владислав Сергеевич

Исследование процессов разрушения при высокоскоростной эрозии материалов

Дипломная работа

Научный руководитель:
к.ф.-м.н, Казаринов Н.А.
Рецензент:
к.ф.-м.н, Груздков А.А.

Санкт-Петербург
2017

SAINT-PETERSBURG STATE UNIVERSITY

Fundamental Mathematics and Mechanics

Mechanics of deformable solids

Vladislav Gurin

Investigation of fracture processes at high-rate erosion of materials

Graduation Thesis

Scientific supervisor:
Candidate of Physics and Mathematics., Kazarinov N.A.
Reviewer:
Doctor of Physics and Mathematics, Grusdkov A.A.

Saint-Petersburg
2017

Содержание

1	Введение и обзор литературы.	2
1.1	<i>Постановка задачи.</i>	4
1.2	<i>Обзор литературы.</i>	4
1.2.1	<i>Общая контактная теория Герца.</i>	4
1.2.2	<i>Задача Лэмба.</i>	6
1.2.3	<i>Использование функции Грина в решении о распространении упругих волн в твердом теле.</i>	8
1.2.4	<i>Численные подходы.</i>	9
2	Моделирование процесса высокоскоростного эрозионного разрушения.	11
2.0.5	<i>Математическая постановка задачи.</i>	11
2.0.6	<i>Критерий инкубационного времени разрушения.</i>	12
2.1	<i>Моделирование тестовой задачи, подготовка к проектированию основной проблемы.</i>	12
2.1.1	<i>Описание тестовой модели.</i>	13
2.1.2	<i>Параметры решения.</i>	17
3	Моделирование высокоскоростного эрозионного разрушения лопатки турбинного двигателя.	18
4	Результаты.	21
5	Выводы.	25
6	Список литературы.	28

1 Введение и обзор литературы.

На сегодняшний день одними из самых распространенных и наиболее изучаемых проблем являются причины и последствия разрушения различного рода материалов. Воздействия, под влиянием которых происходят процессы повреждения или разрушения тех или иных образцов, имеют очень широкую классификацию, в которой далеко не последнее место занимает эрозия материалов, проблемы которой и будут рассматриваться в данной работе.

Под высокоскоростным эрозионным разрушением понимается образование и развитие дефектов на поверхности металлов и других материалов, являющееся следствием механического воздействия различного рода частиц, движущихся с определенной скоростью. С разрушениями такого рода чаще всего можно столкнуться при эксплуатации газо-турбинного двигателя, из составляющих которого наибольшему влиянию эрозии подвержены лопасти компрессора (*рис. 1*). Данная ситуация является достаточно опасной и требует подробного изучения, так как дефекты, возникающие на поверхности лопаток в процессе эрозионного воздействия, могут привести к дисбалансу всей конструкции газо-турбинного двигателя с последующим его отказом. Ухудшение поверхности лопасти из-за эрозии твердыми частицами может оказать существенное влияние на прочность лезвия [1]. Свойства поверхности и ее способность противостоять эрозии являются одним из ключевых факторов, определяющих надежность системы, поскольку различные поверхностные неровности могут служить концентраторами напряжений, снижающими прочность лопасти в условиях высокочастотной циклической нагрузки, типичной для лопаток компрессора [42]. Причиной возникновения такого рода дефектов является запыленность взлетно-посадочных полос и вертолетных площадок, с поверхности которых в двигатели летательных аппаратов попадают частицы песка, кристаллы соли и так далее.

В дальнейшем моделировании и анализе полученных результатов будут использоваться параметры, соответствующие характеристикам вертолета Sokol (польский многоцелевой вертолет, разработанный компанией PZL в конце 1970-х годов) и используемого в его конструкции двигателя TWD-10B/PZL-10S, которые приведены в *таблице 1*.

Интерес к изучению эрозионного разрушения и его последствий стимулирован сложностью самого процесса и важностью рассматриваемой проблемы. Для исследования процесса высокоскоростного эрозионного воздействия существует ряд экспериментов, проводимых на установках, имитирующих условия эрозии, максимально приближенные к эксплуатационным. Чтобы изучить сопротивляемость определенного материала эрозионному воздействию, образцы следует вводить либо в ускоренный поток абразивных частиц [4,5], либо перемещать через абразивную среду [6]. Наиболее используемыми и эффективными являются методы, использующие установки аэродинамического и центробежного типов [7]. К сожалению, в силу трудоемкости и высокой стоимости вышеперечисленные испытания позволяют проводить лишь ограниченное количество экспериментов, а использование



Рис. 1: Ступени компрессора газотурбинного двигателя

только аналитических методов не позволяет учесть реальных условий эксплуатации, геометрию детали, траекторию частицы и другие.

Развитие технологий в последние годы позволило на новом уровне описывать различные процессы и структуры, используя компьютерное моделирование, которое уже успело стать важной составляющей теоретических и прикладных исследований. Таким образом, применяя моделирование в исследованиях, становится реальным не только повышать возможности теоретических расчетов, но и дублировать и оптимизировать дорогостоящие натурные испытания.

В данной работе представлено моделирование процесса эрозионного разрушения лопатки первой ступени компрессорного двигателя TWD-10B/PZL-10S, эксплуатируемого вертолетом Sokol с помощью метода конечных элементов. Использование данного комплекса обусловлено многоцелевой направленностью программы, независимостью от аппаратных средств, высокой точностью расчетов, надежностью проектирования и удобством используемого интерфейса. Задействованный в исследовании комплекс ANSYS использует различные виды решателей. В зависимости от сложности задачи и ее постановки используется тот или иной способ решения.

Эрозию лопаток турбины следует рассматривать как процесс динамического разрушения, поскольку она включает в себя высокоскоростные удары частиц с очень малой продолжительностью, и, следовательно, эти процессы должны обрабатываться с использованием подходов динамического разрушения, поскольку теории статической силы могут привести к ошибочному анализу [8]. Одним из таких подходов является критерий инкубационного времени разрушения [9], позволяющий рассчитывать наблюдаемые в экспериментах по разрушению твердых тел эффекты неустойчивого поведения динамических прочностных характеристик.

При этом важной частью изучения разрушения, в нашем случае высокоскоростного эрозионного разрушения, является определение различных пороговых характеристик, например, критической скорости абразивных ча-

стиц, контактирующих с поверхностью лопастей турбины. Исследование пороговых значений параметров, характеризующих возникновение дефектов, позволяют определить структурно-временные особенности протекающего процесса и эффекты, соответствующие им [10,11].

Помимо компьютерного моделирования эрозионного разрушения, существует множество аналитических подходов, позволяющих получить различные важнейшие характеристические параметры, от значения которых зависит то или иное состояние материала, подверженного эрозии. Далее будут представлены некоторые методы, используемые для описания контактного взаимодействия индентора и упругого полупространства, благодаря которым можно определить историю напряжений, возникающих на поверхности материала, подверженного высокоскоростному контактному воздействию, характерному для задач эрозии, пробивания и так далее.

1.1 Постановка задачи.

Цель данной работы заключается в разработке численной расчетной схемы для предсказания различных характеристик процессов эрозионного разрушения поверхности турбинной лопатки.

В ходе работы для исследования процесса высокоскоростного эрозионного разрушения были поставлены следующие задачи:

- 1) Разработка численной модели, способной моделировать высокоскоростное контактное взаимодействие частицы и лопатки компрессора турбинного двигателя.
- 2) Применение динамического критерия инкубационного времени разрушения к результатам, полученным в ходе решения основной проблемы, для построения различного рода зависимостей.
- 3) Анализ полученных зависимостей пороговых характеристик.
- 4) Оптимизация параметров, влияющих на изменение критической скорости частицы.

1.2 Обзор литературы.

1.2.1 Общая контактная теория Герца.

Основоположником в исследовании эрозионного разрушения является Генрих Герц, опубликовавший в 1881г. в своей работе достаточно полный анализ контактного взаимодействия двух упругих тел [21]. Герц разработал теорию, которая широко применяется и по сей день в различных инженерных сферах, связанных с контактным взаимодействием. Данная теория была разработана для нескольких типов индентора: сферического, цилиндрического, конического и плоского. В данной работе нас будет интересовать в основном сферическое контактирующее тело, соотношения для которого

и будут приведены. Далее рассматривается контакт сферы радиуса R с поверхностью, модуль упругости и коэффициент Пуассона которой равны E и ν соответственно.

Напряжения и перемещения, возникающие в результате контакта двух упругих тел, имеют важное значение при проверке твердости, износостойкости и ударной прочности различных инженерных механизмов и материалов. Теория контактного взаимодействия Герца позволяет найти приближенные значения напряжений, деформаций и других величин внутри контактного пятна и на его границе [13]. Первоначальные исследования контактного взаимодействия, проводимые Генрихом Герцем, анализируются для понимания процесса внедрения (вдавливания) и природы контакта между упругими телами. Следующие предположения позволяют упростить этот анализ:

1) Предполагается, что радиусы кривизны контактирующих тел много больше, чем радиус окружности (эллипса) контактной площадки. Данное допущение позволяет принять каждую поверхность за упругое полупространство, для которого уравнения для напряжений и перемещений уже известны [22]. Также это условие необходимо для предположения малости деформаций в области контакта, чтобы было возможно применение линейной теории упругости.

2) Предполагается, что размеры каждого тела много больше радиуса окружности контактной площадки. Это предположение позволяет нам рассматривать напряжения и деформации вдавливания независимо от тех, которые возникают из геометрии, способов закрепления, и границ каждого тела. Данное условие позволяет нам сказать, что общее поле напряжений в рассматриваемом теле, которое вычисляется благодаря предположению о его неограниченности, незначительно зависит от высоконагруженной области, находящейся на его границе.

3) Контакт между взаимодействующими телами происходит при отсутствии трения. То есть, между индентором и образцом по области контакта возникают только нормальные давления.

Рассматриваемая в данной работе задача о контакте абсолютно жесткой сферической частицы и упругого полупространства имеет достаточно известное аналитическое решение, предложенное Г.Герцем. Согласно проведенным им исследованиям и вычислениям, контактная сила $P(t)$ зависит от расстояния между контактирующими поверхностями (сближения) $h(t)$ следующим образом [15]:

$$P(t) = kh^{\frac{3}{2}}$$

где $k = \frac{4R^{\frac{1}{2}}E}{3(1-\nu^2)}$ с коэффициентом Пуассона ν .

Временная зависимость сближения контактирующих поверхностей может быть найдена из следующего уравнения движения [16,23]:

$$m \frac{d^2 h(t)}{dt^2} = -P(t)$$

где m - масса сферического индентора.

Интегрирование предыдущего соотношения позволяет нам получить скорость сближения частицы и упругого полупространства

$$\frac{dh(t)}{dt} = \sqrt{V^2 - \frac{4k}{5m}[h(t)]^{\frac{5}{2}}}$$

где V - скорость движения частицы.

Из дифференциального уравнения для скорости сближения становится возможным выразить максимальное сближение между контактирующими телами h_0 :

$$h_0 = \left(\frac{5}{4k}mV^2\right)^{\frac{2}{5}}$$

а также соответствующее время контактного взаимодействия t_0 :

$$t_0 = 2.94 \frac{h_0}{V} \approx 3.2 \left(\frac{m^2}{Vk^2}\right)^{\frac{1}{5}}$$

Решение предложенного уравнения движения (7) может быть получено в следующем приближенном виде $h(t) = h_0 \sin \frac{\pi t}{t_0}$, но только если известны величины h_0 и t_0 .

Также при решении рассматриваемой контактной задачи Герца были получены максимальные значения главных напряжений σ_r и σ_θ в цилиндрических координатах, которые возникают на поверхности полупространства на границе контактной области, а также соотношение, определяющее радиус $a(t)$ контактной площадки, зависящий от времени взаимодействия поверхностей [15]:

$$\sigma_r(t) = -\sigma_\theta(t) = \frac{1-2\nu}{2} \frac{P(t)}{\pi a^2(t)}$$

$$a(t) = (3P(t)(1-\nu^2)\frac{R}{4E})^{\frac{1}{3}} = (P(t)\frac{R^{\frac{3}{2}}}{k})^{\frac{1}{3}}$$

1.2.2 Задача Лэмба.

Другая, не менее важная задача, позволяющая отследить перемещение точек упругого полупространства, а следовательно напряжения и деформации, под действием приложенной в точке сосредоточенной внешней импульсной силы, является задача Лэмба, которая была представлена в 1904 г. в статье Лэмба [18] и на которую ссылаются как на работу, в которой впервые были использованы интегральные преобразования в теории упругости. В ходе решения данной проблемы были получены соотношения для перемещений точек границы полупространства, а в трехмерной постановке

удалось добиться выражения смещения точек на границе в виде однократного интеграла.

Явная постановка задачи Лэмба получается из рассмотрения уравнения теории упругости:

$$\rho \ddot{u} = C_{ijkl} \partial_j \partial_l u_k$$

где ρ - плотность, $u(t, x, y)$ - вектор перемещения, $C_{ijkl} = \lambda \delta_{ij} \delta_{kl} + \mu(\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk})$ - тензор Гука. Предполагается отсутствие внешних сил и обращение в нуль компонент σ_{xx}, σ_{xy} тензора напряжений. (Ось x направлена внутрь полупространства, а ось y направлена вдоль ее границы).

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \partial_l u_k$$

Далее, на свободную поверхность полупространства в момент времени $t = 0$ прикладывается (к началу координат) сосредоточенная импульсная сила, импульс которой равен P , направленная перпендикулярно к границе в направлении оси x . Выписывая покомпонентно уравнения теории упругости, граничные и начальные условия, получаем следующую систему:

$$\begin{aligned} \rho \ddot{u}_x &= (\lambda + \mu) \partial_x (\partial_x u_x + \partial_y u_y) + \mu (\partial_x^2 + \partial_y^2) u_x, \\ \rho \ddot{u}_y &= (\lambda + \mu) \partial_y (\partial_x u_x + \partial_y u_y) + \mu (\partial_x^2 + \partial_y^2) u_y, \\ u_x(0, x, y) &= 0, u_y(0, x, y) = 0, \dot{u}_x(0, x, y) = 0, \dot{u}_y(0, x, y) = 0, \\ \sigma_{xx}(t, 0, y) &= (\lambda + 2\mu) \partial_x u_x + \mu \partial_y u_y = -P \delta(y) \delta(t), \\ \sigma_{xy}(t, 0, y) &= \mu (\partial_x u_y + \partial_y u_x) = 0 \end{aligned}$$

Для удобства можно переписать данную систему в терминах скоростей продольных и поперечных волн

$$\begin{aligned} v_{||}^2 &= \frac{\lambda + 2\mu}{\rho}, v_{\perp}^2 = \frac{\mu}{\rho}, \\ \gamma &= \frac{v_{||}}{v_{\perp}}, \tau = v_{||} t \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \gamma^2 \ddot{u}_x &= (\gamma^2 - 1) \partial_x (\partial_x u_x + \partial_y u_y) + (\partial_x^2 + \partial_y^2) u_x, \\ \gamma^2 \ddot{u}_y &= (\gamma^2 - 1) \partial_y (\partial_x u_x + \partial_y u_y) + (\partial_x^2 + \partial_y^2) u_y, \\ u_x(0, x, y) &= 0, u_y(0, x, y) = 0, \dot{u}_x(0, x, y) = 0, \dot{u}_y(0, x, y) = 0, \\ \sigma_{xx}(\tau, 0, y) &= \mu [\gamma^2 \partial_x u_x + (\gamma^2 - 2) \partial_y u_y] = -P v_{||} \delta(y) \delta(t), \\ \sigma_{xy}(\tau, 0, y) &= \mu (\partial_x u_y + \partial_y u_x) = 0 \end{aligned}$$

В переписанной системе дифференцирование происходит уже не по переменной t , а по переменной τ .

Последняя система (3.4), переписанная с использованием скоростей продольных и поперечных волн, называется задачей Лэмба [18], решение которой и будет рассматриваться в дальнейшем.

Используя преобразование Лапласа по времени

$$V_{x,y}(\omega, x, y) = \int_0^{\infty} d\tau e^{-\omega\tau} u_{x,y}(\tau, x, y)$$

и преобразование Фурье для V по координате y ,

$$U_{x,y}(\omega, x, k) = \int_{-\infty}^{+\infty} dy e^{iky} V_{x,y}(\omega, x, y)$$

получаем систему, из которой находятся соотношения для образов

$$U_x = -\frac{Pv_{||}\alpha_2}{\mu R(\omega, k)} [2k^2 e^{-\alpha_1 x} - \alpha_5^2 e^{-\alpha_2 x}]$$

$$U_y = -\frac{Pv_{||}ik}{\mu R(\omega, k)} [-2\alpha_1\alpha_2 e^{-\alpha_1 x} + \alpha_5^2 e^{-\alpha_2 x}]$$

Остается лишь применить обратные преобразования к полученным выражениям в (4.11), чтобы получить искомые перемещения точек упругого полупространства:

$$V_{x,y}(\omega, x, y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{dk}{2\pi} e^{iky} U_{x,y}(\omega, x, k)$$

$$u_{x,y}(\tau, x, y) = \frac{1}{2\pi i} \int_C d\omega e^{\omega\tau} V_{x,y}(\omega, x, y)$$

Использование данного аналитического решения хоть и трудоемко, и не учитывает форму контактирующего с полупространством индентора, но в отличие от динамической постановки задачи Герца не подразумевает использование аппроксимаций при выводе искомых соотношений.

1.2.3 Использование функции Грина в решении о распространении упругих волн в твердом теле.

Решение задачи Лэмба можно рассматривать как функцию Грина для уравнения упругих волн в равномерном полупространстве, и использовать для рассмотрения сил более сложных, чем приложенный в точке импульс. Например, такая функция Грина является одной из основных составляющих в теореме о представлении Burridge and Knopoff (1964), что является

одним из наиболее элегантных приближений к задаче моделирования землетрясения. Функцию Грина можно рассматривать как реакцию на сконцентрированную в точке импульсную силу и определять как перемещение, созданное силой, приложенной в точке, в определенном направлении. Поскольку вектор силы и вектор перемещения имеют по три компоненты, функция Грина является тензором 3×3 [19].

Распространение упругих волн в изотропных упругих материалах описывается уравнением эластодинамики:

$$\rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} u(x, t) = f(x, t) + (\lambda + \mu) \nabla(\nabla u(x, t)) + \mu \nabla^2 u(x, t)$$

Решение данного уравнения может быть найдено в форме, использующей функцию Грина, $G_{in}(x, t; \eta, \tau)$, которая описывает перемещение в направлении i в точке x в момент времени t , соответствующее приложенному импульсу в точке η в направлении n в момент времени τ [30]. Таким образом, функция Грина может быть определена как решение уравнения эластодинамики при действующей импульсной силе $f_n = \delta_{ni} \delta_{Dirac}(\tau) \delta_{Dirac}(\eta)$. Если местоположение η , в котором действует силовое динамическое поле, заменяется точкой η_0 , то функцию Грина можно разложить в ряд Тейлора в окрестности этой точки [31]. Принимая во внимание только первые члены разложения, компоненты вектора перемещения могут быть выражены следующим образом:

$$u_i(x, t) = G_{in}(x, t; \eta_0, \tau) \otimes f_n(\eta_0, \tau),$$

где \otimes представляет собой свертку по времени, и функция $f_n(\eta_0, \tau)$ есть функция источника равная сумме всех сил в точке η .

Если предполагается, что перемещения $u_i(t)$ и силы $f_n(\tau)$ действуют только в направлении нормали к поверхности, то предыдущее соотношение сводится к скалярному уравнению:

$$u_3(t) = g_{33}(x_0, t; \eta_0, \tau) \otimes f_3(\eta_0, \tau),$$

где система координат выбрана так, что направление "3" совпадает с направлением нормали к пластине. Ожидается, что будет допущена небольшая погрешность в силу используемых нами предположений, так как такой источник возмущений как импульсный удар сферы создает силы, действующие в областях, размеры которых малы по сравнению с измеренными длинами волн, и направление приложенных сил достаточно близко к нормали плоскости полупространства.

1.2.4 Численные подходы.

Существуют большое количество работ и литературы по моделированию процессов эрозии твердых тел. Чаще всего процесс эрозионного разрушения рассматривается как срезание материала, при этом разрушение

предполагается пластическим [32]. В дальнейшем было определено четыре действующих в сочетании друг с другом механизма (усталость, плавление, хрупкое разрушение, разрезание), посредством чего твердые частицы отделяют материал от целевой поверхности [33]. Вклад этих подмеханизмов для конкретного эрозионного процесса зависит от нескольких факторов таких, как кинетическая энергия абразивной частицы, угол и форма удара, а также свойства материала мишени.

Для того, чтобы понимать физику процесса удаления материала эрозионным воздействием, было сделано много экспериментальных исследований [34]. Эмпирически измерялась объемная доля, а также исследовать механизм эрозии, анализируя изношенную поверхность и условия, при которых происходило разрушение. Однако эрозия представляет собой сложный процесс, обусловленный многими факторами, из-за которых практически очень сложно объяснить все наблюдаемые экспериментально эффекты. Компьютерное моделирование позволяет проводить "виртуальные эксперименты" в контролируемых условиях и обеспечивает эффективный подход, дополняющий экспериментальные методы для фундаментального понимания процесса. В нашем случае компьютерное моделирование используется, чтобы предсказать поведение материала во время воздействия твердыми абразивными частицами.

Ряд авторов попытались решить указанную проблему удаления материала с помощью численных методов, основанных на методе конечных элементов. Численные методы, возможно, не смогут обеспечить детальное понимание некоторых процессов на микроскопическом уровне, тем не менее, они являются достаточно удобными, так как способны имитировать эрозию или механическую обработку в различных условиях (тип материала, скорость частиц, размер, форма, угол удара и т.д.), что ведет к значительному сокращению затрат по сравнению с эквивалентным экспериментированием.

Была также изучена экспериментально и с помощью моделирования эрозия структурно мягкой стали, нержавеющей стали и ферритного сферического графитового чугуна [35]. Однако моделирование, проведенное в данной работе, не включало никаких критериев разрушения и рассматривался случай плоской деформации. В другой работе [36] было проанализировано влияние удара одной частицы на сферичность кратера на поверхности заготовки из нержавеющей стали с использованием программного обеспечения ANSYS/LS-DYNA FEA с учетом различных скоростей частиц и ударных углов. Данная работа [36] была усовершенствована применением модели Джонсона-Кука и использованием конечно-элементного пакета Abaqus [37].

Конечно-элементный метод также применялся для моделирования эрозионного износа [38], для изучения остаточных напряжений, возникающих в результате удара одной частицы [39], для оценки количества кинетической энергии, рассеиваемой из-за распространения волны напряжений и пластической деформации [40], для определения пластической деформации и скорости пластической деформации [41].

2 Моделирование процесса высокоскоростного эрозионного разрушения.

2.0.5 Математическая постановка задачи.

Далее нами будет рассматриваться контактная задача об ударе сферической частицы о целевую поверхность. С математической точки зрения данная задача может быть поставлена следующим образом:

Определяющие уравнения:

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \nabla_i (\nabla \cdot \bar{u}) + \mu \Delta u_i$$

$$\sigma_{i,j} = \delta_{i,j} \lambda \nabla \cdot \bar{u} + \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

Граничные условия:

$$\left. \frac{\partial u_y}{\partial t} \right|_{(x,y) \in \Omega_1} = v = const$$

$$u_x|_{(x,y) \in \Gamma_1 \cup \Gamma_2} = 0$$

$$\bar{u}(x, y \in \Omega_2, t = 0) = 0$$

$$\left. \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right|_{(x,y) \in \Omega_2, t=0} = \left. \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right|_{(x,y) \in \Omega_2, t=0} = 0$$

2.0.6 Критерий инкубационного времени разрушения.

В дальнейшем нас будет интересовать определение пороговых характеристик, при которых наблюдается разрушение поверхности материалов. Но для определения этих критических параметров должны быть использованы соответствующие критерии разрушения, которые позволят нам выразить интересующие нас зависимости и учесть динамические особенности рассматриваемого процесса. Исследуемое нами высокоскоростное эрозионное разрушение по своей природе является динамическим процессом, следовательно, для определения критических величин должен применяться соответствующий критерий разрушения. Одним из наиболее эффективных критериев, применяющихся при динамических взаимодействиях, является критерий инкубационного времени разрушения [43].

Для разрушения бездефектных сред критерий инкубационного времени принимает вид

$$\int_{t-\tau}^t \sigma(t') dt' \geq \sigma_c \tau,$$

при выполнении которого будет наблюдаться откол в материале. В представленном соотношении $\sigma(t')$ - зависимость локального напряжения в месте разрыва от времени, σ_c - статическая прочность.

Для случая эрозионного воздействия частиц критерий (1.2) принимает следующий вид:

$$\max_t \int_{t-\tau}^t \sigma_r(V, R, s) ds = \sigma_c \tau,$$

где σ_r - это зависящая от времени радиальная составляющая растягивающих напряжений, возникающая на поверхности исследуемого объекта, которая в большинстве случаев является причиной образования поверхностных трещин. Также предполагается, что σ_r зависит от скорости частицы V и радиуса частицы R .

2.1 Моделирование тестовой задачи, подготовка к проектированию основной проблемы.

К сожалению, в настоящее время исследователям приходится сталкиваться с огромным количеством задач, либо не поддающихся аналитическим методам решения, либо требующих значительных ресурсов на их экспериментальную реализацию. Но благодаря развитию численного моделирования, круг задач, поддающихся анализу, заметно расширился. Одним из таких эффективных методов является метод конечных элементов (МКЭ), который позволяет смоделировать с достаточно высокой точностью задачи различных типов, включая задачи обтекания тел потоком жидкости и задачи электродинамики.

В данной работе была разработана модель контактного взаимодействия в пакете ANSYS, использующем метод конечных элементов. Представленный пакет позволяет решать задачи как в квазистатической, так и в динамической постановках. Рассматриваемая нами задача об ударе сферического индентора о поверхность лопатки компрессора газо-турбинного двигателя является динамической, контактной, нелинейной, требующей учета малых перемещений и деформаций. Нелинейные задачи имеют две схемы решения: явная (explicit) и неявная (implicit)[26]. Неявная схема, используемая в конечно-элементном пакете ANSYS, в котором и осуществляется проектирование, является безусловно устойчивой, то есть не зависит от шага интегрирования, что является преимуществом перед явной схемой решения нелинейных задач.

Контактные задачи представляют некоторые сложности для моделирования, так как области контакта обычно заранее не известны. В связи с этим, в данной работе создана тестовая модель контактной задачи для отладки работы контактного взаимодействия, проводимых в дальнейшем на основной проектируемой модели. Тестовая модель описывает классический контакт Герца, а именно взаимодействие абсолютно жесткого индентора с упругим полупространством. Данный подход позволит учесть все сложности моделирования контактных задач и воссоздать максимально точно реальные условия эрозионного разрушения лопатки компрессора газо-турбинного двигателя.

2.1.1 Описание тестовой модели.

Рассмотрим два контактирующих тела 1 (сфера) и 2 (полупространство), объемом V^1 и V^2 , характерные размеры которых соответственно $R = 0.05\text{mm}$ и $0.01\text{mm} \times 0.27\text{mm} \times 0.27\text{mm}$. Для описания материала модели полупространства был выбран линейный упругий изотропный материал (сталь EI-961) с плотностью $\rho = 7800 \text{ кг/м}^3$, $E = 200 \cdot 10^9 \text{ Па}$, коэффициент Пуассона $\nu = 0.3$.

Геометрия моделируемых тел представлена на *рис.2.*

Для построения сетки и разбиения обоих тел на составляющие берутся конечные элементы типа SOLID185, которые используются для моделирования трехмерных сплошных тел. Элементы данного типа используют стандартный метод, в котором коэффициенты объемной деформации в точках интеграции Гаусса заменяются средней объемной деформацией элементов. Этот метод также известен как метод селективного редуцированного интегрирования [25]. Использование этого метода помогает предотвратить объемную блокировку сетки в почти несжимаемых случаях.

Далее тело разбивается на конечные элементы, размеры которых задаются функцией ESIZE, с помощью команды MESH. Разбиение может проводиться двумя способами: FREE и MAPPED MESHING, первый из которых не имеет ограничений по форме элементов, в то время как второй способ обычно имеет регулярный шаблон с явными рядами элементов. В нашем

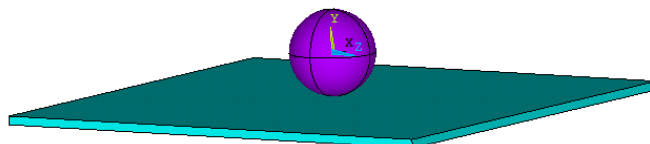


Рис. 2: Построение геометрии контактирующих тел для тестовой задачи

случае будет использоваться MAPPED MESHING ввиду простоты геометрии цели (рис.3).

Разбиение сферы проводилось с использованием элементов TARGET170, которые используются для представления различных трехмерных "целевых" поверхностей для соответствующих контактных элементов (CONTA173). Сами контактные элементы накладываются на твердые элементы SOLID185, описывающие границу деформируемого тела, и потенциально находятся в контакте с поверхностью мишени, определяемой элементами TARGET170. Эта целевая поверхность дискретизируется набором элементов целевого сегмента (TARGET170) и сопряжена с соответствующей контактной поверхностью, поверхностью полупространства, через общий набор вещественных констант (Real Constants).

Контактирующая поверхность формировалась следующим образом. Упругая целевая поверхность была покрыта соответствующими контактными элементами CONTA173, связанными с элементами TARGET170, с помощью которых было произведено разбиение сферического тела. Контакт был сформирован при отсутствии трения, использовался контактный алгоритм на основе расширенного метода Лагранжа и нелинейный тип поведения контакта Standart [27]. Форма взаимодействующих тел до деформирования и рассчитанное поле напряжений (радиальная составляющая σ_r) после деформации показаны на рис.4

Рекомендуемые параметры для расчета контакта:

1) Для того, чтобы определить контактирующие области (contact detection), применялся метод определения гауссовых точек интегрирования (Gauss integration

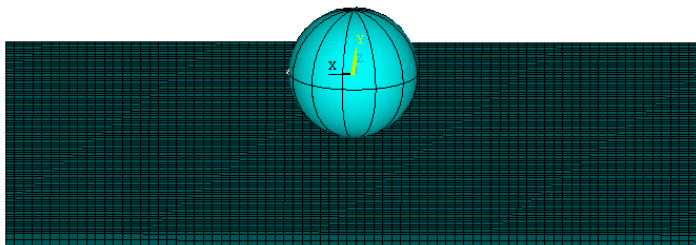


Рис. 3: Разбиение контактирующих тел на конечные элементы

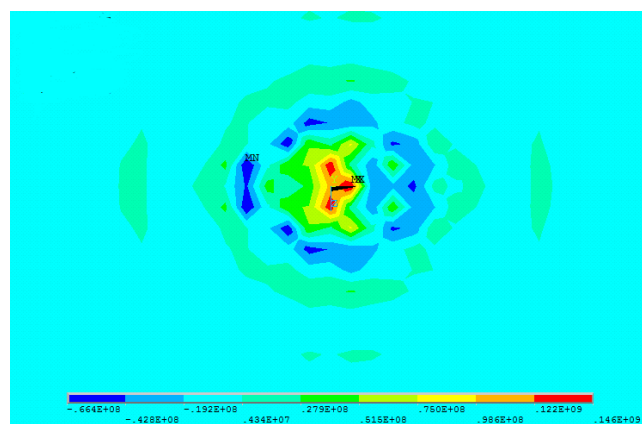


Рис. 4: Визуализация напряженного состояния поверхности полупространства

points).

2) Алгоритмом расчета контакта выбирался Augmented Lagrange method, в котором используются итерационное повторение алгоритма метода штрафа [24].

3) Для коэффициента контактной жесткости (FKN), принималось значение, равное единице. Жесткость контакта вычисляется автоматически, основываясь на форме элементов, участвующих в контакте, модуля Юнга и FKN, значение которого задается пользователем и используется как параметр штрафа. Контактная жесткость и точность расчета перемещения узлов контактирующих поверхностей имеют прямо пропорциональную зависимость. К тому же, высокая контактная жесткость не исключает тот факт, что элементы поверхности могут быть искажены. Достаточно полагать, что расчет может быть проведен при коэффициенте контактной жесткости $FKN = 1$.

4) В проведенном расчете также было исключено взаимное проникновение контактирующих поверхностей, параметру Initial Penetration было присвоен статус Exclude everything.

5) Значение коэффициента трения взаимодействующих поверхностей было установлено нулевым для упрощения расчетов.

Остальные параметры контакта были оставлены по умолчанию.

При моделировании контактного взаимодействия тестовой задачи возникает потребность в определении сферической частицы как абсолютно твердого тела [28]. Данный подход позволяет пренебрегать деформациями, возникающими на поверхности тела 1, и тем самым, в достаточной мере уменьшить вычисления, производимые решателем, а следовательно, время и память, затрачиваемые на решение.

Абсолютно жесткое тело в конечно элементном пакете ANSYS состоит из набора целевых узлов, называемых узлами абсолютно жесткого тела, и единичного контрольного узла. Движение всего тела регулируется степенями свободы контрольного узла, что позволяет точно представить геометрию, массу и инерцию вращения твердого тела. В большинстве случаев, абсолютно твердое тело может быть определено на внешней поверхности, предварительно дискретизированной конечными элементами SOLID, SHELL, BEAM (называемые "базовыми" элементами). Внешняя поверхность разбитого на элементы тела покрывается целевыми элементами TARGET170 в трехмерном случае, TARGET169 - в двумерном. Наиболее эффективное моделирование абсолютно твердого тела должно содержать ограниченное число узлов, которые либо связаны с другими элементами, либо подчиняются граничным условиям.

В дополнение к этому, любое абсолютно твердое тело также должно быть связано с его контрольным узлом. Целевые элементы, определяющие контрольный узел, должны идентифицироваться тем же набором реальных констант (Real Constants), что и целевые элементы, из которых составлена поверхность моделируемого тела. Контрольный узел, в отличие от других типов, используется для определения степеней свободы всего жесткого тела. Все возможные движения, совершаемые телом, будут составлять комби-

нацию трансляций и вращения вокруг контрольного узла. Данный подход представляет собой удобный и мощный способ задания граничных условий, таких как, вращения, перемещения, моменты, напряжения, магнитные потенциалы на всем твердом теле. В используемом нами анализе, контрольный узел помещается в центр масс сферы.

Однако, в пакете ANSYS, используемые для определения абсолютно жесткого тела целевые элементы не вносят вклад в массу системы конечных элементов. Наиболее эффективным способом учесть массу является добавление элемента точечной массы MASS21 на гравитационном центре твердого тела, где могут быть оценены как центр масс, так и свойства инерции вращения всего тела.

2.1.2 Параметры решения.

Дальнейшее исследование смоделированной задачи предполагает установления некоторых параметров решателя, а именно, время и шаг интегрирования, граничные условия, значения нагрузок, действующих на тело, и другие.

1) Прежде всего предлагается выбрать тип анализа, который будет использоваться при решении. В нашем решении будет применен Transient Dynamic Analysis, характерный для динамических задач и использующийся для определения динамической реакции структуры под действием нагрузок, зависящих от времени.

2) Временной интервал между последовательными точками времени, называемый шагом интегрирования, был взят равным $t_i = 1.5 \cdot 10^{-7}$ сек. В то время как общее время решения было взято равным $t = 0.75 \cdot 10^{-4}$ сек. Значение шага интегрирования было взято с учетом того факта, что данный параметр не должен превосходить времени пробега продольной волны одного элемента разбиения.

3) Использование Transient Dynamic Analysis в рассматриваемой задаче подразумевает определение начальных условий, в частности начальной скорости V_0 . Точка приложения начальной скорости является контрольный узел в центре сферы, сгенерированный при создании контактной пары и используемый для определения степеней свободы всего абсолютного жесткого тела. Значение приложенной к сферическому индентору начальной скорости равно $V_0 = 310$ м/с.

4) Используемый тип анализа подразумевает исключения больших деформационных эффектов, что достигается путем использования функции NLGEOM,OFF.

5) Граничные условия определяются путем ограничения всех степеней свободы узлов нижней поверхности полупространства, таким образом для них обнуляются все узловые перемещения и повороты.

6) Элементы управления выходными данными позволяют записать полученные в ходе решения результаты на любом заданном временном интервале, что является удобным инструментом для отслеживания данных и дальнейшей их обработки. Для вывода решений используются функции

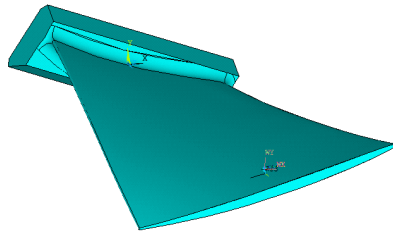


Рис. 5: Геометрия лопатки турбинного двигателя и частицы

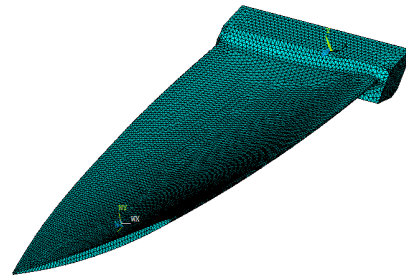


Рис. 6: Разбиение модели на конечные элементы типа SOLID185

OUTPR и OUTRES.

3 *Моделирование высокоскоростного эрозионного разрушения лопатки турбинного двигателя.*

В отличие от приведенной ранее тестовой задачи, моделирование удара частицы о поверхность лопатки оказывается достаточно трудоемким ввиду сложности геометрии поверхности лопатки. Построение сетки с достаточно большим количеством элементов требует значительных затрат компьютерных ресурсов и времени для получения и вывода решения, в то время как недостаточное количество конечных элементов разбиения может привести к неточным результатам. Поэтому данная задача требует оптимизированного разбиения объектов и определения "целевых" и "контактных" элементов.

1) *Задание геометрических характеристик объектов.*

Геометрические размеры модели лопатки полностью соответствуют параметрам реально существующей детали эксплуатируемого вертолетом Sokol двигателя TWD-10B/PZL-10S [29].

В дальнейшем рассматривается взаимодействие с поверхностью лопатки частиц, значение радиуса которых лежит в интервале от 100 мкм до 400 мкм, что соответствует размерам крупного песка. Геометрия участвующих в контакте тел представлена на *рис.5*.

2) *Свойства материала.*

В данном исследовании нас интересует эрозионное разрушение авиационных сплавов. В связи с этим, рассматривался материал EI-961, параметры которого приведены в *таблице 1*.

Модуль Юнга (E)	200 ГПа
Коэффициент Пуассона (ν)	0.28
Плотность (ρ)	7800 кг/м ³
Статическая прочность (σ_c)	1000 МПа
Инкубационное время разрушения (τ)	0.04 мкс

Таблица 1: Свойства материала EI-961

Изменение параметров материала при моделировании позволяет менять его свойства, тем самым исследовать характеристики других сплавов и структур при эрозии и проводить оптимизацию с точки зрения устойчивости эрозионному воздействию.

3) *Разбиение тел на конечные элементы.*

Данному этапу моделирования уделяется особое внимание, так как точность решения задачи зависит во многом от правильного построения сетки конечных элементов в различных областях взаимодействующих тел. Так же как и в смоделированной ранее тестовой задаче при разбиении тел были использованы конечные элементы SOLID185. Данный тип элемента определяется восемью узлами, имеющими три степени свободы в каждом из них (сдвиги в узловых направлениях x, y, z).

Для более точных вычислений интересующих нас максимальных растягивающих напряжений на поверхности лопатки было предпринято проектирование более мелкой сетки в зоне контакта рассматриваемых тел, где и наблюдаются максимальные значения напряжений, согласно контактной теории Герца. Данный шаг подразумевал разбиение контактной зоны на элементы, порядок которых бы совпадал с порядком "целевых" конечных элементов, на которые был разбит сферический индентор. Таким образом размер данных элементов был задан функцией AESIZE, входным параметром которой являлся коэффициент разделения поверхности, равный 0.0001. Сферическое тело было разбито на 3638 элементов, в то время как количество элементов разбиения лопатки первоначально равнялось 83765, а оптимизированное разбиение содержало уже 133977 элементов, 2216 из которых соответствовали усовершенствованной области контакта. Разбиение поверхностей обоих тел представлены на *рис. 6* и усовершенствованной области на *рис. 7*.

4) *Определение контактной и целевой поверхностей, задание контактных параметров.*

Для определения контактной пары в конечно-элементном пакете ANSYS используется следующий подход. Вначале определяется тип контакта (node-to-node, node-to-surface, surface-to-surface и другие). В нашем случае используется контакт типа surface-to-surface. В задачах, связанных с контактом между двумя границами, одна из границ устанавливается как "целе-

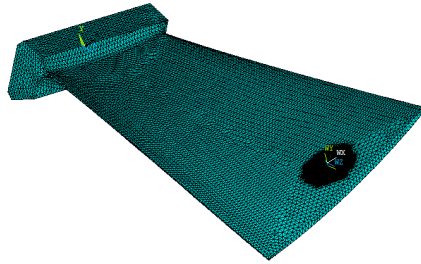


Рис. 7: Разбиение модели на конечные элементы типа SOLID185

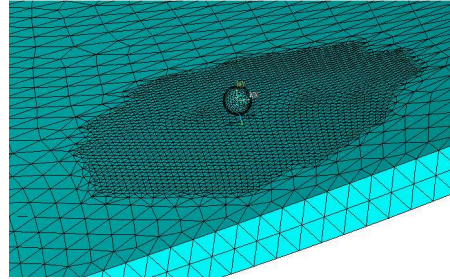


Рис. 8: Разбиение сферической частицы на конечные элементы и улучшение разбиения зоны контакта

вая "поверхность", а другая как "контактная". Контактная поверхность определяется набором сгенерированных на ней конечных элементов CONTA173. Эти контактные элементы имеют те же самые геометрические характеристики, что и базовые элементы (SOLID185), на которые была разбита поверхность лопатки. "Целевая" поверхность определяется сгенерированными на уже существующем ее разбиении элементами TARGET170. Оба типа элементов связаны друг с другом через общий набор реальных констант (Real Constant Set), используемых для контроля контактного взаимодействия. Зона контакта может быть произвольной, но для более эффективного решения была определена меньшая локализованная область, на которой и были сгенерированы конечные элементы CONTA173. Данный подход позволяет увеличить точность решения и уменьшить время, затраченное на него.

5) *Задание граничных условий*

В используемом в данном исследовании конечно-элементном пакете структурные ограничения степеней свободы могут быть определены для отдельных узлов. В частности, можно ограничить каждый узел вдоль любого из трех направлений оси (x, y, z) локальной системы координат, чтобы имитировать виды поддержки, которые требуются модели. В нашем случае, для узлов, принадлежащих поверхностям торца лопатки, определяются нулевые перемещения и нулевые повороты по всем трем направлениям x, y, z .

6) *Определение нагрузок и начальных условий.*

Прежде чем выполнить полный динамический анализ модели, требуется установить начальные условия и шаг интегрирования. В рассматриваемой нами задаче начальные условия включает в себя начальную скорость частицы, значение которой соответствует сумме крейсерской скорости вертолета Sokol и скорости вращения лопатки компрессора двигателя TWD-10B/PZL-10S [29], приведенным в *таблице 2*. Таким образом, результирующая скорость полета частицы будет равна $V_0 = 323$. Приведенное значение началь-

Скорость вращения лопатки компрессора, рад/сек	2870
Скорость летательного аппарата, км/ч	250
Результирующая скорость полета частицы, м/с	323 сек.

Таблица 2: Параметры вертолета Sokol и двигателя TWD-10B/PZL-10S

ной скорости сферической частицы прилагается ко всем узлам элементов, на которые он была разбита. Начальные условия, в том числе и начальная скорость, при решении устанавливается на первом шаге нагрузки (load step).

7) *Параметры решения, шаг нагружения, время..*

Используемый нами при решении тип анализа Transient Dynamic Analysis характерен для динамических задач и применяется для нахождения изменяющихся во времени перемещений, напряжений, деформаций и сил, возникающих в структуре. Данный тип анализа подразумевает определение шага нагружения, и общего время решения, которые равны соответственно $t_0 = 2 \cdot 10^{-8}$ сек. и $t = 0.5 \cdot 10^{-4}$ сек. Время шага нагружения выбирается таким образом, чтобы оно не превосходило времени прохождения продольной волны одного элемента разбиения. Данная опция используется для структуризации выходных величин и управления сходимостью рассматриваемого решения.

В исследуемое решение была включена опция интеграции времени для учета эффектов инерционных и эффектов сопротивления, которые должны быть включены в динамический анализ. Также решение искалось в предположении малых деформаций, что отражено в математической постановке задачи.

8) *Вывод и обработка результатов*

Используемый конечно-элементный пакет благодаря средствам постпроцессорной обработки данных позволяет обращаться к полученным при решении результатам, использовать их для построения различного рода зависимостей и визуализировать полученные данные. На *рис.9* представлено рассчитанное поле напряжений на поверхности лопатки компрессора газотурбинного двигателя благодаря средствам визуализации, используемыми конечно-элементным пакетом ANSYS.

4 *Результаты.*

1) В ходе исследования были выдвинуты некоторые предположения, касающиеся достаточно сложной геометрии лопатки компрессора. На представленном ранее *рис.5* наблюдается заметное уменьшение толщины пластины при приближении к краю образца. Возник вопрос о зависимости

Количество элементов	140343
Количество узлов	29432
Время взаимодействия	$0.5 * 10^{-4}$ сек.
Время шага нагружения	$2 * 10^{-8}$ сек.
Количество шагов нагружения	2500

Таблица 3: Основные параметры используемые при решении

критической скорости движения от места падения поражающей частицы. Помимо посчитанной ранее конечно элементной модели, в которой место взаимодействия "контактных" и "целевых" элементов располагалось на оси симметрии поверхности лопасти, была сформирована и рассчитана задача со смещенным к краю пятном контакта. Данная модель представлена на *рис.12*, а визуализация вычисленного поля напряжений смещенного к краю контактного пятна - на *рис.9*.

Полученные результаты в ходе моделирования соответствуют выдвинутому нами ранее предположению. Действительно, критическая скорость движения индентора заметно выше в первой постановке задачи, чем во второй. Уменьшение порогового значения для скорости частицы происходит по мере приближения к краю контактной поверхности образца. Данные, полученные при решении, представлены в *таблице 4*.

Другим подтверждением предполагаемого нами явления является экспериментальная составляющая. Как видно из *рис.15*, возникшие в результате эрозионного разрушения повреждения сконцентрированы вблизи края лопаток, рассматриваемых нами при моделировании. Таким образом, наиболее опасной зоной для эрозионного разрушения абразивными частицами является край лопатки компрессора турбинного двигателя. Дальнейшие расчеты пороговой скорости при варьировании различных параметров будут проводиться в зоне, приближенной к краю образца.

2) Были определены пороговые значения скорости поражающей частицы для различных значений ее радиуса и была построена соответствующая зависимость, представленная на *рис.10*. По полученным в ходе решения данным можно заметить, что увеличение радиуса сферической частицы приводит к уменьшению порогового значения скорости, при котором наблюдается эрозионное разрушение поверхностных слоев лопатки компрессора турбинного двигателя. Учитывая скорость взлета/посадки рассматриваемой нами модели вертолета (Sokol) и скорость вращения лопастей компрессора двигателей (TWD-10B/PZL-10S), эксплуатируемых им, можно утверждать, что пребывание в рассматриваемом режиме наиболее опасно в зонах взлета/посадки с поражающими частицами, размеры которых могут превышать 300 мкм.

3) В связи с достаточно произвольным движением абразивных частиц по отношению к поверхности лопатки компрессора возникла потребность в изучении зависимости критической скорости полета от угла падения части-

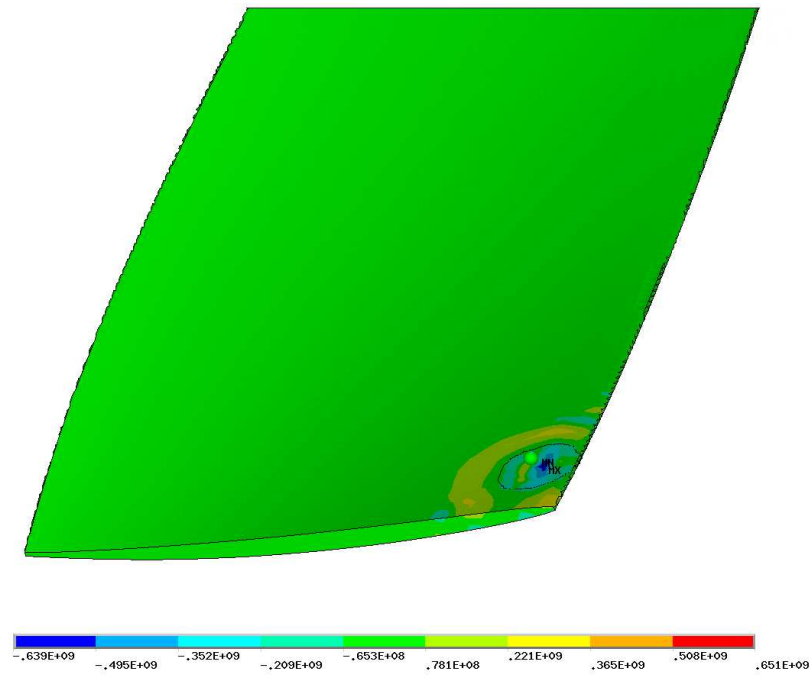


Рис. 9: Поле напряжений, возникающее на поверхности лопатки компрессора

	Критическая скорость, м/с
Центр	567
Край	334

Таблица 4: Зависимость критической скорости V от места контакта

цы $V(\alpha)$. Исследования такого рода зависимости позволяет проанализировать в полной мере процесс эрозионного разрушения и учесть все аспекты рассматриваемого контактного взаимодействия.

Согласно полученным результатам в ходе моделирования, уменьшение градусной меры угла между вектором скорости частицы и целевой поверхностью значительно увеличивает пороговое значение скорости, при котором будет наблюдаться разрушение (*рис.11*).

4) Другой, не менее важной характеристикой материала при динамическом воздействии, является инкубационное время разрушения [9]. Варьируя значения данной величины τ можно проанализировать изменение соответствующих пороговых характеристик, в нашем случае критической скорости. Согласно полученным результатам увеличение параметра, характеризующего инкубационное время τ , приводит к возрастанию пороговой скорости частицы. Из этого утверждения можно сделать вывод о том, что

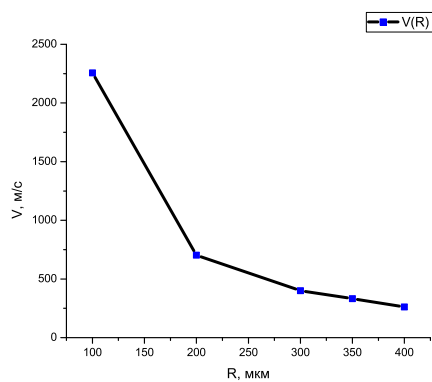


Рис. 10: Зависимость критической скорости V от радиуса частицы R

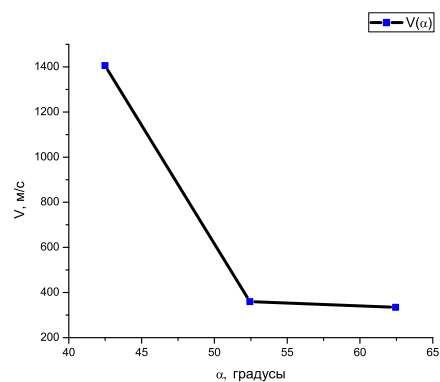


Рис. 11: Зависимость критической скорости V от угла падения частицы α

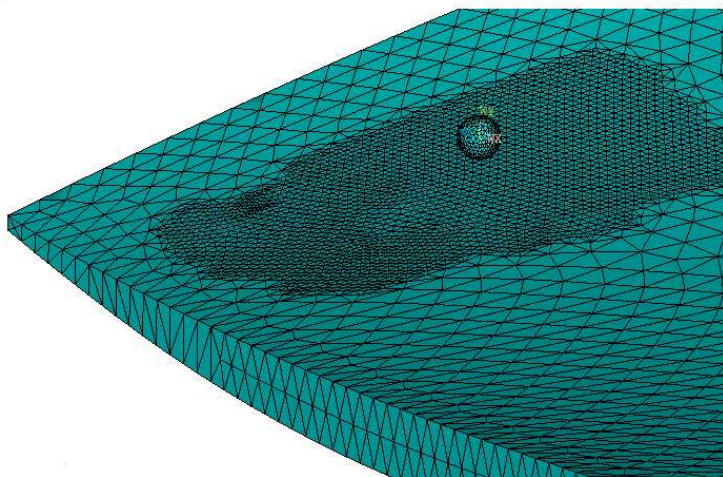


Рис. 12: Разбиение модели на конечные элементы типа SOLID185

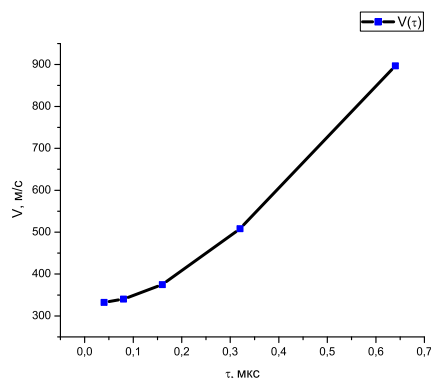


Рис. 13: Зависимость критической скорости V от инкубационного времени разрушения τ

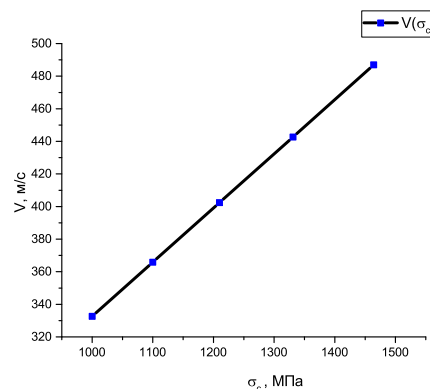


Рис. 14: Зависимость критической скорости V от статической прочности материала σ_c

одним из способов борьбы с эрозионным разрушением является разработка новых, инновационных материалов с более высоким значением инкубационного времени. Подтверждением этому являются приведенные на *рис.13* данные, описывающие изменение критической скорости при варьировании параметра τ .

5) Также в ходе исследования была найдена линейная связь между критическим параметром скорости частицы и статической прочностью материала. Данная зависимость представлена на *рис.14*

5 Выводы.

1) В данном исследовании была разработана универсальная численная модель для анализа процессов разрушения поверхности лопатки компрессора турбинного двигателя TWD-10B/PZL-10S в результате эрозионного воздействия. Благодаря возможности варьирования констант материала и параметров моделируемого решения можно исследовать новые структуры и инновационные сплавы. Данный подход помогает избежать проведения дорогостоящих экспериментов и имеет практическое применение в различных инженерных сферах. Описанный метод изучения эрозионного воздействия является полезным инструментом для инженерных потребностей, так как он предоставляет информацию о поведении материала в реальных условиях.

2) Применяя к полученной в ходе решения истории напряжений уравнения контактной теории Герца, были определены пороговые значения скорости удара частицы для различных значений ее радиуса частиц. Из полученной зависимости наблюдалось увеличение критической скорости при увеличении размеров поражающей частицы (*рис.10*). Таким образом, для



Рис. 15: Последствия эрозионного разрушения

стандартного режима полета воздушного судна были найдены критические размеры поражающих частиц, при взаимодействии лопатки компрессора газотурбинного двигателя с которыми, наблюдается эрозионное разрушение поверхности исследуемого образца.

3) В ходе исследования были найдены пороговые скорости, при которых наблюдается разрушение поверхности лопатки, для различных значений углов полета поражающей частицы. Данная зависимость представлена на *рис.11*. Можно заметить, что при увеличении угла падения относительно нормали к поверхности контакта пороговое значение скорости частицы увеличивается. Таким образом, данная зависимость позволяет сделать вывод о возможности оптимизации геометрии лопатки компрессора газотурбинного двигателя путем увеличения угла падения частицы относительно нормали к поверхности образца.

4) При решении поставленной нами основной задачи также была выявлена зависимость критического значения скорости от параметра инкубационного времени разрушения τ , являющегося характеристикой материала. График, описывающий изменение пороговой скорости частицы при варьировании параметра τ , представлен на *рис.13*. Из построенной по результатам моделирования кривой видно, что наименее подверженными эрозионному разрушению являются материалы с высоким значением инкубационного времени разрушения τ . Следовательно, возникает возможность оптимизации свойств материала для повышения критической скорости удара частицы.

5) Сравнивались пороговые значения скоростей для различных мест контакта поверхности и абразивной частицы. При смещении к боковым гра-

ницам лопатки зоны контакта наблюдалось уменьшение критической скорости, что определяет наиболее подверженные эрозионному разрушению зоны, а именно, наиболее близкие к краю образца области. Данное утверждение позволяет улучшать прочностные параметры материала не по всему объему, а лишь в тех областях, где наиболее возможно возникновение критических дефектов вследствие эрозионного воздействия.

6 Список литературы.

- 1) Hamed A.A., Tabakoff W., Rivir, R.B., Das, K., Arora, P. Turbine blade surface deterioration by erosion // Journal of Turbomachinery (2005), 127(3). 445-452.
- 2) H.Kolsky. Proc. Phys. Soc. B 62, 1949. 676.
- 3) A.M. Bragov, A.K. Lomunov. Int J. Impact Eng. 16, 1995. 321.
- 4) Hamed A.A., Tabakoff W., Rivir, R.B., Das, K., Arora, P. Turbine blade surface deterioration by erosion // Journal of Turbomachinery, 2005, 127. 445-452."
- 5) A.V. Levy, G. Hickey, Liquid-solid particle slurry erosion of steels // Wear 117, 1987. 129-146.
- 6) D.G. Rickerby, N.H. Macmillan, The erosion of aluminium by solid particle impingement at normal incidence // Wear 60, 1980. 369-382.
- 7) Juan R. Laguna-Camacho, M. Vite-Torres, E.A. Gallardo-Hernandez and E.E. Vera-Cardenas, Solid particle erosion on different metallic materials // Tribology in engineering (2013), InTech, DOI:10.5772/51176
- 8) Y.V.Petrov, N.F.Morozov, V.I.Smirnov, Structural macromechanics approach in dynamics of fracture // Fatigue Fract Engng Mater Struct 2003, 26(4). 363-372.
- 9) Ю.В.Петров, П.А.Глебовский, Критерий инкубационного времени в задачах импульсного разрушения и электрического пробоя // Журнал технической физики, 2004, том 74, вып. 11.
- 10) А.Н.Березкин, А.А.Уткин, С.И.Кривошеев, Ю.В.Петров // ДАН 375, 2000. 121.
- 11) В.А.Братов, А.А.Груздков, С.И.Кривошеев, Ю.В.Петров // ДАН 396, 2004. 345.
- 12) Anthony C. Fisher-Cripps, Introduction to Contact Mechanics, second edition, 2007. 101-102.
- 13) Anthony C. Fisher-Cripps, Introduction to Contact Mechanics, second edition, 2007. 102-105.
- 14) Н.А Горбушин, Г.А. Волков, Ю.В. Петров, О влиянии геометрической формы частицы на пороговую энергию при эрозионном разрушении // Журнал технической физики, 2013, том 83, вып. 3.
- 15) Джонсон К., Механика контактного взаимодействия // М.:Наука, 1989. 510 с.
- 16) Колесников Ю.В., Морозов Е.М., Механика контактного разрушения // М.:Наука, 1989. 224с.
- 17) Smirnov V.I., Strength of materials, Vol.39. N 1., 2007. 46-52.
- 18) H. Lamb, On the propagation of tremors over the surface of an elastic solid // Phil. Trans. Roy. Soc. London A203, 1904. 1-42.
- 19) R. Snieder, General Theory of elastic waves scattering, 2002, chapter 1.7.1.
- 20) James R. Rice, Notes on electrodynamics, Green's function, and response to transformation strain and crack or fault sources, 1998.
- 21) H. Hertz, On the vibration elastic bodies // J.Reine Angew. Math. 92, 1882, 156-171

- 22) Anthony C. Fisher-Cripps, Introduction to Contact Mechanics, second edition, 2007. chapter 5, 78-91.
- 23) V. I. Smirnov, On the Effect of the Geometric Shape of Abrasive Particles on the Threshold Rate of Erosion // Probl. Prochn., No. 1, 69–78, 2007 [Strength of Materials (Engl. Transl.) 39 (1), 46–52, 2007].
- 24) Банди Б., Методы оптимизации. Вводный курс // М.: Радио и связь, 1988.
- 25) Басов К.А. ANSYS. Справочник пользователя // М.: ДМК Пресс, 2011. -640с.
- 26) Калиткин Н.Н., Численные методы // М.: Наука, 1978.-512с.
- 27) Кабанов Ю., Контактные технологии в действии, Часть 2, ANSYS Solutions, Русская редакция, 2007. 5-10.
- 28) ANSYS Mechanical APDL Multibody Analysis Guide, 2013.-66с.
- 29) EASA, Type-Certificate Data Sheet, No. E.129, 2015. 8.
- 30) Aki K. and Richards P.G., Quantitative Seismology, Theory and Methods, Volume 1, 1980, 557pp., Eq.2.36.
- 31) Stump B., Johnson L., The determination of source properties by the linear inversion of seismographs // Bull. Seismol. Soc. Am. 67, 1977. 1489-1520.
- 32) I. Finnie, Erosion of surfaces by solid particles // Wear 3, 1960. 87–103.
- 33) H.C. Meng, K.C. Ludema, Wear model and prediction equations: their form and content // Wear 181–183, 1995. 443–457.
- 34) A. Lebar, M. Junkar, Simulation of abrasive waterjet machining based on unit event features // Proc. Inst. Mech. Eng. Part B: J. Eng. Manuf. 217 (5), 2003. 699–703.
- 35) K. Shimizu, T. Noguchi, H. Seitoh, M. Okadab, Y. Matsubara, FEM analysis of erosive wear // Wear 250, 2001. 779–784.
- 36) M. Junkar, B. Jurisevic, M. Fajdiga, M. Grah, Finite element analysis of single-particle impact in abrasive water jet machining // Impact Eng. 32, 2006. 1095–1112.
- 37) S.Y. Ahmadi-Brooghani, H. Hassanzadeh, P. Kahhal, Modeling of single-particle impact in abrasive water jet machining // Int. J. Mech. Syst. Sci. Eng. 1 (4), 2007. 231–236.
- 38) M.S. ElTobgy, E. Ng, M.A. Elbestawi, Finite element modeling of erosive wear // Int. J. Mach. Tools Manuf. 45, 2005. 1337–1346.
- 39) B.L. Boyce, X. Chen, J.W. Hutchinson, R.O. Ritchie, The residual stress state due to a spherical hard-body impact // Mech. Mater. 33, 2001. 441–454.
- 40) C. Wu, L. Li, C. Thornton, Energy dissipation during normal impact of elastic and elastic-plastic spheres // Impact Eng. 32, 2005. 593–604.
- 41) J.P. Davim, C. Maranhao, A study of plastic strain and plastic strain rate in machining of steel AISI 1045 using FEM analysis // Mater. Des. 30 (1), 2009. 160–165.
- 42) Shiozawa, K., Lu, L., Ishihara, S. (2001). S–N curve characteristics and subsurface crack initiation behaviour in ultralong life fatigue of a high carbonchromium bearing steel // Fatigue Fracture of Engineering Materials Structures, 24(12), 781-790.
- 43) Petrov Yu V., Utkin A. A., Dependence of the dynamic strength on loading

rate. // Materials Science 25.2, 1989. 153-156.